

Primena DML tehnologije u ozvučavanju visokoreverberantnih prostora

Dragan Novković

Departman za Audio i video tehnologije
Visoka škola elektrotehnike i računarstva
Beograd, Srbija
dragannovkovic72@gmail.com

Sadržaj— Informacija koja se prenosi putem razglasnog sistema mora biti svima koji se nalaze u prostoru koji je predmet ozvučavanja podjednako razumljiva i dostupna. Upravo je ovo cilj koji je u klasičnim sistemima ozvučavanja najteže, a često i praktično nemoguće, realizovati. Ovaj rad se u svom prvom delu bavi ukazivanjem na ograničenja koje klasični zvučnički sistemi sa sobom nose. U drugom delu rada se predstavlja DML tehnologija. U trećem delu rada se ukazuje na sve prednosti koje ona sa sobom nosi u odnosu na klasične zvučničke sisteme. U četvrtom delu su predstavljeni rezultati softverske simulacije pobude visokoreverberantnog prostora jednim i drugim sistemom. Na osnovu prethodno definisanih zaključaka u radu, i na osnovu rezultata softverske simulacije, izveden je zaključak da su DML sistemi superiorni po svojim karakteristikama za primenu u ozvučavanju visokoreverberantnih prostora.

Ključne riječi-ozvučavanje, razumljivost govora, uniformna pokrivenost, difuznost, DML tehnologija.

I. UVOD

Koncept reprodukcije zvuka klasičnim zvučnicima (patent star preko 100 godina), koji podrazumeva postojanje klasične membrane i višesistemske zvučne kutije podrazumeva pristajanje na gomilu neophodnih kompromisa, sa kojima smo se, hteli mi to ili ne, potpuno saživeli i na koje bez razmišljanja pristajemo. Jedna od osnovnih karakteristika zračenja prilikom reprodukcije zvuka kod klasičnih zvučnika sa konusnim oblikom membrane je da se različite frekvencije na različite strane emituju na različite načine. Ovo je osobina zvučnika koja se naziva usmerenost, i ona je u potpunosti frekvencijski zavisna. Kada se početna zvučna informacija na ovaj način izrači u prostor, zvučno polje koje se formira postaje izrazito nehomogeno i nepravilno, sa naglašenim zonama stojećih talasa u kojima se akustička energija na nekim frekvencijama i na nekim mestima u prostoru zadržava ili potiskuje. Ovakav način formiranja zvučnog polja je praktično potpuno nekontrolisan, izuzetno nepovoljan i u potpunosti zavisna od konkretne pozicije zvučnika u prostoru, sa jedne, i pozicije slušaoca, sa druge strane [1]. Upravo zbog fizičke limitiranosti klasične membrane da zrači pun opseg audio frekvencija, zvučnički sistemi podrazumevaju upotrebu više različitih zvučnika za pobudu svih potrebnih frekvencija u prostoru koji se ozvučava, kao i neophodnu upotrebu sistema zvučničkih skretnica. Kada se na to doda i nemogućnost

klasične membrane da u opsegu niskih frekvencija pobudi prostor bez razdvajanja prednjeg i zadnjeg dela, tj. činjenica da je zvučnike neophodno zatvarati u namenski projektovane zvučne kutije, lako dolazimo do zaključka da je nesumnjivi kvalitet zvuka koji današnji zvučnički sistemi mogu da isporuče mogao biti postignut samo uz poštovanje ovih početnih, izuzetno nepovoljnih uslova u projektovanju. Neophodnost poštovanja ovih početnih uslova podrazumeva pristajanje na kompromise u svim fazama projektovanja zvučničkih sistema. Upravo ti početni uslovi, i njima uslovljeni kompromisi u dizajnu, predstavljaju izvor velikih problema do kojih dolazi u svakodnevnoj praksi ozvučavanja [1]. Svi ovi problemi se dodatno ističu u visokoreverberantnim, akustički neobrađenim prostorima, što javni prostori poput autobuskih stanica, aerodromskih zgrada, holova, crkava itd., svakako jesu.

II. PRIMENA DML TEHNOLOGIJE

DML (Distributed Mode Loudspeaker) tehnologija reprodukcije zvuka, patentirana je u Velikoj Britaniji 1991. godine. Inicijalna ideja pokretanja ravne površine na oscilovanje u funkciji izvora zvuka je bila usmerena ka pobudama materijala u frekvencijskim zonama iznad frekvencije koincidencije, kako bi se izbegao diskontinuitet u frekvencijskoj karakteristici zračenja. Ova logika je iziskivala upotrebu veoma lakih i krutih materijala, koji sami po sebi nisu pogodni za prenos vibracija. Britanska Defence Evaluation and Research Agency (DERA) se ovakvim sistemima bavila u svojim eksperimentima sa stižavanjem buke u helikopterima, razvivši tom prilikom namenski uređaj, elektrodinamički pretvarač, pobuđivač ravnih površina koji na njih prenosi akustičke vibracije. Ovaj pobuđivač je tako projektovan da radi i u opsegu ispod frekvencije koincidencije materijala i u njemu obezbeđuje praktično potpunu difuznost zračenja[1]. Iznad frekvencije koincidencije dolazi do pojave slabo izražene i frekvencijski zavisne usmerenosti. Pogodnim izborom materijala, frekvenciju koincidencije je moguće pomeriti u zone visokih frekvencija, čime se pojava delimične usmerenosti ovakvog zvučnog izvora izmešta u manje kritične frekvencijske opsege [3]. Iz svega ovoga možemo izvesti zaključak da se DML ponaša kao praktično omnidirekcionni tip

izvora u opsegu frekvencija od interesa. U zavisnosti od vrste korišćenih materijala, njihove dimenzije kao i načina na koji se vrši pobuda, dolazi do potrebe razdvojenog pobuđivanja opsega niskih frekvencija, najčešće u opsegu ispod 150-200 Hz. U ove svrhe se u razglasnim sistemima ovog tipa koriste namenski reproduktori zvuka niskih frekvencija – *subwoofer* zvučnici.

Akustičku snagu zračenja DML izvora zvuka, izraženu u dB u odnosu na referencu od 1pW, moguće je izračunati prema sledećoj jednačini [4]:

$$L = 10\log(u)^2 + 10\log S + 10\log\sigma + 10\log(\rho c/10^{-12})$$

U ovoj jednačini u predstavlja prosečnu brzinu zvučnog talasa u materijalu koji se pobuđuje na oscilovanje, S je površina materijala dok je σ efikasnost zračenja. Efikasnost zračenja je veličina koja je uslovljena načinom na koji se formiraju rezonantne pojave u procesu oscilovanja materijala, i zavisi od sledećih konkretnih karakteristika ploče:

- 1) geometrijskog odnosa dužine i širine ploče.
- 2) graničnih uslova (slobodna ili stegnuta ivica ploče i sl.)
- 3) krutosti ploče i njene varijacije po uzdužnim osama
- 4) površinske mase
- 5) prigušenja oscilacija u materijalu

Efikasnost zračenja svoj maksimum dostiže na frekvenciji koinkidencije, koja prevashodno zavisi od krutosti i mase ploče. Geometrijski odnosi stranica ploče definišu modalnu raspodelu u njoj, od koje primarno zavisi način zračenja u frekvencijskoj zoni ispod frekvencije koinkidencije. Za modove nižeg reda, zračenje se obavlja u aktivnoj zoni od ivice do ivice ploče, pri čemu zračenje za mod (1,1) poprima karakteristike zračenja klasične klipne membrane. Relativni fazni odnosi između modova su takođe bitni u analizi zračenja, pogotovo u opsegu nižih rezonantnih učestanosti. Ovi modovi se mogu superponirati ili poništavati, u zavisnosti od konkretnih uslova oscilovanja, i na taj način bitno uticati na konačnu efikasnost zračenja ploče. S obzirom da upravo na ove odnose presudno utiče tačna pozicija i broj pobuđivača na ploči, ovom problemu se takođe mora posvetiti velika pažnja pri projektovanju DML zvučnih izvora[4].

III. UPOREDNE KARAKTERISTIKA DML I KLASIČNIH ZVUČNIČKIH SISTEMA

Na osnovu teoretskih predispozicija načina zračenja DML i klasičnih zvučnih izvora, kao i na osnovu rezultata objektivnih merenja i praktičnog iskustva u radu sa njima, moguće je izvesti sledeće zaključke o uporednim karakteristikama ova dva tipa izvora zvuka[4]:

1) *Usmerenost konvencionalnih zvučnika izrazito raste sa porastom frekvencije. DML izvori zvuka su izrazito neusmereni u većem delu frekvencijskog opsega.*

2) *Klasični zvučnički sistemi moraju biti višesistemski, kako bi bilo izvršeno ravnomerno pokrivanje svih frekvencija od interesa. DML zvučni izvor je sam po sebi dovoljan da pokrije ceo opseg od interesa, sa eventualno potrebnim dodatnim izvorom za reprodukciju zvuka u opsegu najnižih frekvencija.*

3) *U skladu sa prethodnim, klasični zvučnički sistemi moraju posedovati sistem skretnica sa nepovoljnom pojavom rezne frekvencije koja se nalazi u opsegu najveće osetljivosti ljudskog čula sluha (tipično opseg od 1-3kHz). Kod DML izvora se rezna frekvencija na kojoj niskotonski zvučnik preuzima zračenje od ploče, ukoliko potreba za tako nečim u konkretnom sistemu postoji, nalazi u opsegu izrazito smanjene osetljivosti ljudskog čula sluha (tipično 150 – 200Hz).*

4) *Zbog pojave faznog poništavanja generisanih zvučnih talasa niskih frekvencija (u ovom opsegu membrana zvučnika se ponaša kao klipna membrana) u prednjoj i zadnjoj zoni zvučničke membrane, kod klasičnih zvučnika je neophodno izvršiti fizičko razdvajanje ove dve zone. Kod DML izvora zvuka ovaj problem praktično ne postoji.*

5) *Problem klasičnih zvučnika naveden u prethodnoj tački se najčešće rešava zatvaranjem istih u zvučne kutije, što samo po sebi implicira dalje probleme pre svega u vidu pojave modalnih frekvencija unutar same kutije koje povretnosprežno utiču na kretanje i zračenje membrane. DML zvučni izvori ne zahtevaju nikakvo zatvaranje u kutije.*

6) *Sam dizajn klasičnih elektrodinamičkih zvučnika uslovljava postojanje visoko izražene reaktivne komponente ekvivalentne impedanse, što bitno utiče na niskofrekvencijski odziv i ukupni bilans snaga. DML izvori zvuka imaju čisto reaktivnu, frekvencijski nezavisnu impedansu u opsegu zračenja.*

7) *Frekvencijski opseg rada DML izvora može biti u potpunosti uporediv sa opsegom koji obezbeđuju klasični zvučnički sistemi, ukoliko se na pravilan način izvrši njegovo projektovanje.*

8) *Praktično potpuna neusmerenost DML zvučnog izvora u praksi, u odnosu na klasične, usmerene zvučničke sisteme omogućava daleko manji stepen interakcije zvučnog izvora sa akustičkim karakteristikam prostora koji se ozvučava.*

9) *Akustička margina pojave povratne sprege u sistemima koji se ozvučavaju primenom DML tehnologije se bitno povećava, kako usled činjenice da ne postoji klasična laka membrana koja se lako uvodi u stanje pojačanog oscilovanja na rezonantnoj učestanosti, tako i usled činjenice da je znatno smanjena pojava izraženo fokusiranih i jakih refleksija na*

mestu mikrofona, usled povećane difuznosti zvučnog polja koje se formira.

10) *Ravnomernost pokrivanja prostora, u smislu istih karakteristika zvučnog polja u bilo kojoj tački prostora koji je predmet ozvučavanja, se znatno izdiže upotrebom DML izvora.* Pravilnom postavkom DML izvora u prostoru, moguće je formirati zvučno polje izrazito difuznog karaktera, kakvo ni na jedan način nije moguće formirati upotrebom klasičnih zvučničkih sistema.

11) *Ekskurzije membrane klasičnih zvučnika, koje su standardna pojava pri reprodukciji niskog opsega učestanosti, su znatno veće u odnosu na pomeraje koji se ostavljaju u pobuđivačima DML tip.* Iz ovog razloga je relativno lako postići da koeficijenti harmonijskih izobličenja DML izvora zvuka budu manji od na isti način merenih koeficijenata izobličenja klasičnih zvučnika.

12) *Osetljivost i efikasnost DML zvučnika je u potpunosti uporediva sa klasičnim zvučnicima, uz vođenje računa o, pre svega, parametrima krutosti i mase ploče.* Povećanje akustičke snage DML izvora je moguće ostvariti samim povećanjem dimenzija ploče, čime se utiče i na spuštanje donje granične učestanosti frekvencijskog opsega izvora.

IV. UPOREDNA ANALIZA PRIMENOM SOFTVERSKE SIMULACIJE

DML tehnologija, dakle, podrazumeva prenos akustičke energije na bilo koju površinu koja može da vibrira. To praktično znači da klasična membrana i zvučna kutija, koje jesu izvor gorepomenutih problema, više ne postoje. Zvučno polje koje se na ovaj način formira je u izrazito pravilno, na taj način da se sve frekvencije na sve strane zrače potpuno ravnomerno. Matematička analiza načina zračenja površine kao izvora zvuka ukazuje na ovu pojavu kroz frekvencijsku statističku ravnomernost pojave velikog broja malih, nezavisnih izvora zvuka koji se u površini formiraju prilikom prenosa inicijalne vibracije na nju [4]. Ovakav način reprodukcije zvuka u visokoreverberantnim prostorima formira zvučno polje koje ni na jedan način ne pati od gore pomenutih problema: zvučno polje je izrazito homogeno, dok je pojava stojećih talasa svedena na minimalnu meru. To za posledicu ima izrazitu ravnomernost u pokrivanju prostora prilikom ozvučavanja (svi prisutni slušaoci čuju isti zvuk, bez obzira gde se nalaze), dok se razumljivost govora i visok estetski doživljaj zvuka sa lakoćom postižu.

U cilju ilustracije ovih tvrdnji, u Visokoj školi elektrotehnike i računarstava je rađena softverska simulacija formiranja zvučnog polja u zavisnosti od vrste korišćenih izvora. Na sl.1 je predstavljena softverska simulacija realizovana u softverskom paketu EASE situacije u kojoj je modeliran konkretan, nadprosečno reverberantan prostor

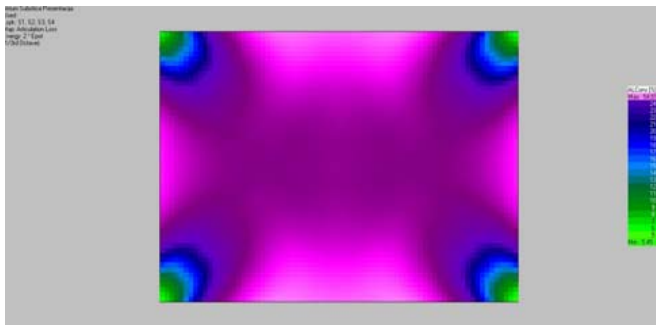
dimenzija cca. 30x40x25 metara (veliki atrijum hotela Galleria u Subotici) [5]. Modelirani prostor je sa sve četiri strane okružen zgradama koje oivičavaju gradski trg površine cca. 1200m², dok je tavanica prostora realizovana kao staklena konstrukcija. Sam prostor u praksi pokazuje izrazito nepovoljan akustičke osobine, što se manifestuje velikim problemima do kojih dolazi pri pokušaju ozvučavanja prostora klasičnim zvučničkim sistemima.

Na slikama je oznakama boja praćen parametar razumljivosti govora AL_{cons} (Articulation Loss Consonants). Ovaj parametar se izražava u procentima, i što je niži razumljivost govora je viša. Sve vrednosti parametra do 3% podrazumevaju odličnu razumljivost govora (svetlo zelena boja), od 3% do 7% razumljivost se smatra dobrom (zelena/tamno zelena boja), dok se za vrednosti AL_{cons} između 7% i 15% razumljivost karakteriše kao prihvatljiva (tamno zelena/svetlo plava boja). Za sve vrednosti parametra veće od 15% (plava/tamno i plava/crvena boja) razumljivost nije zadovoljavajuća, tj. u tim zonama se ne može očekivati ispravan prenos informacija u procesu ozvučavanja. Kao što se sa slike 1 može videti, pokušaj ozvučavanja ovakvog prostora klasičnim zvučnicima daje neprihvatljive rezultate u smislu vrednosti praćenog parametra, bez obzira na broj zvučnika koji se koriste. Zone dobre razumljivosti se nalaze uz sam izvor zvuka, sa tendencijom naglog opadanja razumljivosti sa udaljavanjem od istog. Dodavanjem većeg broja zvučnika dolazi do pojave novih zona dobre razumljivosti, ali opet samo u njihovoj neposrednoj blizini. Praktično jedini način da se zona dobre razumljivosti govora proširi je izdizanje nivoa direktnog zvuka, tj. pojačavanje zvuka u prostoru koji se ozvučava. Ovo je dobro poznat efekat iz prakse ozvučavanja, kada slušaoci u zoni dobre razumljivosti blizu zvučnika trpe neprimereno i nezdravo velike zvučne pritiske, oni udaljeniji i dalje ne razumeju o čemu se priča, dok veoma mala skupina ljudi eventualno dobija ono što treba da dobije u procesu kvalitetnog ozvučavanja.

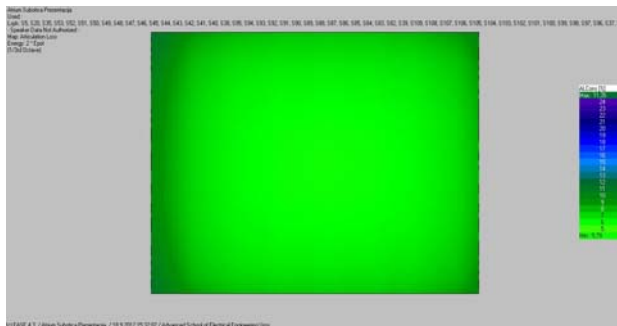
Dakle, estetski kvalitet ozvučavanja i razumljivost govora su direktno zavisni od pozicije zvučnog izvora i slušaoca u prostoru koji se ozvučava. Ova svakako nepovoljna okolnost je posebno naglašena u visokoreverberantnim prostorima, kakvi se u praksi veoma često i ozvučavaju (holovi, sportske sale i arene, crkve, hramovi, čekaonice i sl.). Pri svemu tome svakako treba imati u vidu da se pojačavanjem reprodukcije sve loše akustičke osobine prostora dodatno naglašavaju i ističu. Rešavanje problema loše pobude izdizanjem iste nije logično u samom startu, tako da se bolji rezultati i ne mogu očekivati.

Na sl. 2 je prikazana na identičan način realizovana softverska simulacija ozvučavanja istog prostora, samo što su ovog puta u simulaciju umesto klasičnih zvučničkih sistema kao izvori zvuka ubačeni DML elementi, sa svim karakteristikama koje oni poseduju, i koji su predstavljeni u prethodnom delu rada. Kao što se sa slike lako da videti, zavisnost parametra AL_{cons} od pozicije u prostoru praktično

više ne postoji, što u praksi znači da je postignuto praktično idealno pokrivanje i razumljivost govora. Ovakav rezultat jednostavno nije moguće postići postupcima ozvučavanja prostora upotrebom klasičnih zvučnih sistema.



Slika 1. Softverska simulacija primera ozvučavanja visokoreverberantnog prostora klasičnim zvučnim sistemima. ALcons kao parametar.



Slika 2. Softverska simulacija primera ozvučavanja visokoreverberantnog prostora DML tehnologijom. ALcons kao parametar.

Takođe je sa predstavljenih slika lako izvesti zaključak o postizanju odličnih rezultata po pitanju razumljivosti govora, s obzirom da praćeni parametra AL_{cons} ima vrednosti odlične i dobre razumljivosti u praktično celom prostoru. Pri formiranju modela simulacije, poštovani su principi realnosti u smislu da su pozicije u koje su postavljani klasični zvučni izvori odabrane u skladu sa zahtevima i potrebama za njihovo postavljanje i montažu u prostoru. Višesistemske zvučne kutije potrebne za ozvučavanje prostora ovalike zapremine ($V = 30.000 \text{ m}^3$) moraju biti izrazito teške, što podrazumeva njihovo postavljanje na namenske nosače koji direktno definišu pozicije u prostoru, najčešće blizu bočnih zidova prostora na visini od 2 do 5 metara. S druge strane, DML izvori zvuka su izrazito laki, te se u tom smislu mogu postaviti u znatno veći broj tačaka u prostoru. Za potrebe rešavanja konkretnog problema ozvučavanja ovog prostora je razrađeno praktično rešenje za njihovo postavljanje u zonu iznad posmatrača, što pri upotrebi klasičnih zvučnih sistema ne bi bilo moguće izvesti. Ovo rešenje je inkorporirano u proces izrade predstavljene simulacije, što je još jedan od razloga za postizanje ovako superiornog izgleda zvučnog polja koje se u

prostoru formira upotrebom DML elemenata u odnosu na klasične zvučne sisteme.

V. ZAKLJUČAK

Ovaj rad ima za cilj da predstavi široj naučnoj javnosti osnovne teoretske principe koji određuju način rada DML izvora zvuka, uz istovremeno isticanje praktičnih konsekvenci do kojih dolazi pri njihovoj upotrebi u sistemima za ozvučavanje, kroz uporednu analizu sa klasičnim zvučnim sistemima. Na osnovu ovako iznetih podataka, lako se izvodi zaključak da upotreba DML zvučnih izvora u postupcima ozvučavanja visokoreverberantnih prostora poseduje superiorne karakteristike u odnosu na klasične razglasne sisteme. Ova teorijom dokazana činjenica je u ovom radu potkrepljena i uporednom softverskom analizom rezultata ozvučavanja jednog istog prostora upotrebom oba tipa razgalsnih sistema. Ovakvi rezultati su potvrđeni i u svakodnevnoj inženjerskoj praksi.

LITERATURA

- [1] J. Borwick, Loudspeaker and Headphone Handbook, Focal Press, 2001
- [2] Technical Document, NXT White Paper, New Transducers Ltd, 2002
- [3] L. Cremer, M. Heckel, E.E. Ungar, Physics for Science and Engineering, Hont Saunders, 1982
- [4] N. Mackenzie, Distributed Mode Loudspeakers, Acoustics 2002, Innovation in Acoustics and Vibration Annual Conference of the Australian Acoustical Society
- [5] J. Panzer, N. Harris, Distributed Mode Loudspeakers Simulation Model, 104th AES Convention, Amsterdam, 1998.

ABSTRACT

This paper has intention to highlight the theory behind DML technology, and to point to some relevant conclusions about it's usage in sound systems design. Second part of this paper is introducing comparative characteristics of classical sound systems, and those which designe is based on DML technology. Software simulation of speech inteligibility dispersion in highly reverberant space depending on the type of sound system that has been used is introduced in the last part of this paper.

IMPLEMENTATION OF DML TECHNOLOGY IN THE FIELD OF SOUND SYSTEM DESIGN IN HIGHLY REVERBERANT SPACES

Dragan Novkovic